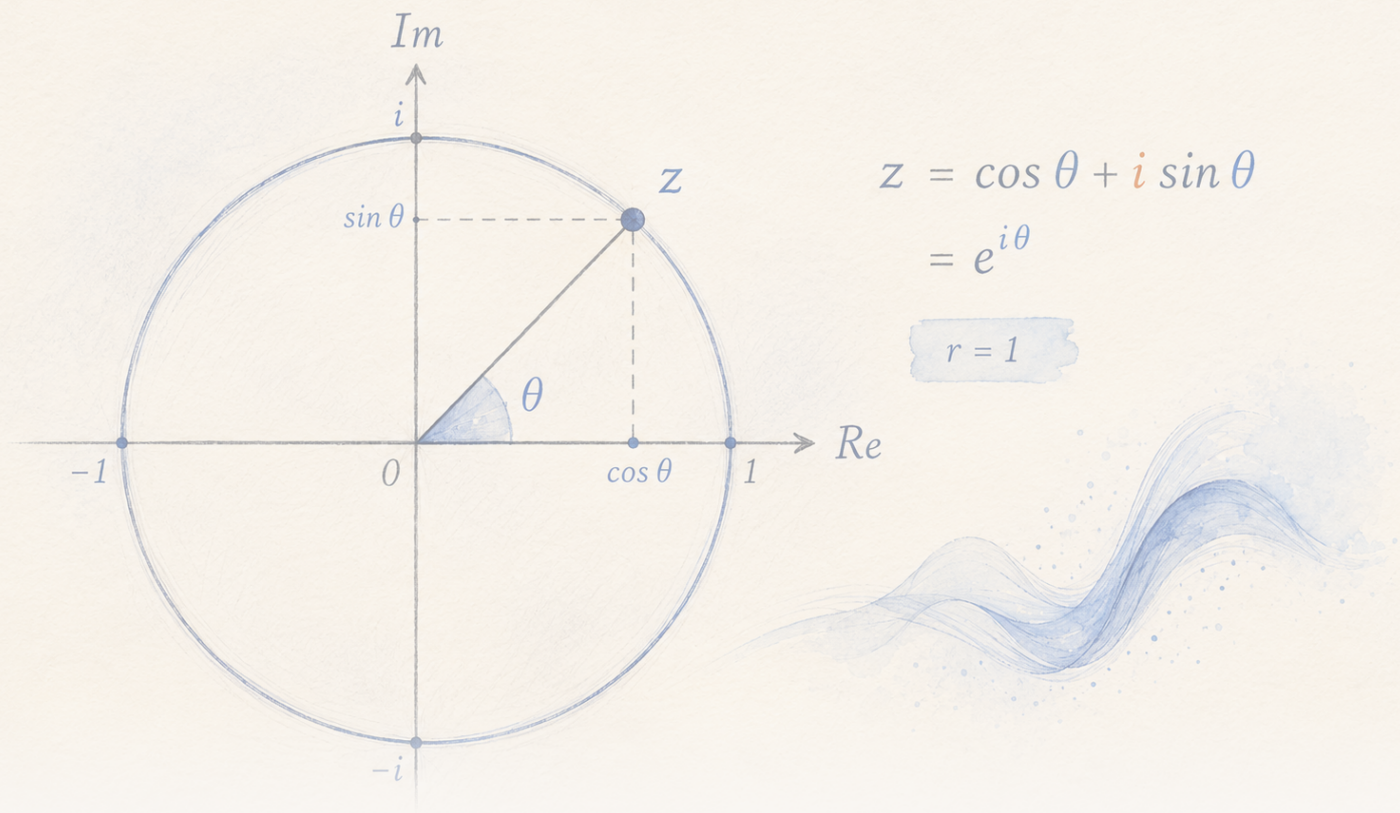




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

量子力學可以只用實數書寫——問題在於你如何組合系統

2021 年一項被廣泛報導的結果認為，一個實數版本的量子力學可以在實驗上被證偽，隨後的 2022 年實驗與標準複數量子理論一致。這常被標題化為虛數是物理上真實的證據。一篇發表在《物理評論快報》上的新論文收緊了這一論斷：將實數表述建立在一個不同的、可以在物理上更為基本的關於分離系統如何組合的假設上，它就能重現複數量子力學的每一個預測，包括多體檢驗。誠實的解讀是：複數是方便的，而非嚴格必要的——而早前的實驗排除了一個特定的實數理論，而非原則上的實數。這是一個紙面上的基礎結果，不是一次新的測量，它也不要求任何人停止使用複數。

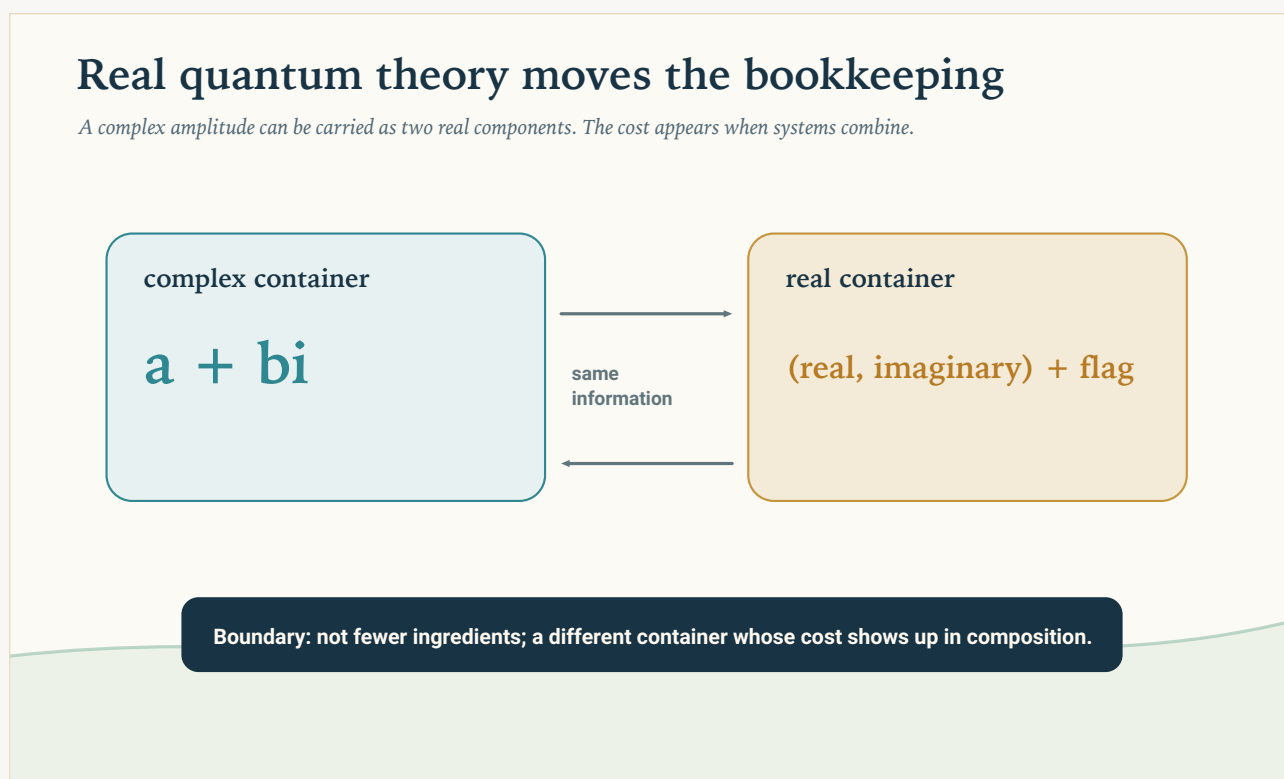
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum Mechanics Based on Real Numbers: A Consistent Description*, Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping, Dagmar Bruss, Physical Review Letters · DOI: 10.1103/4k13-sdjh

一個值得重讀的標題

幾年前，一個引人注目的說法流傳開來：實驗表明虛數是物理上真實的，量子力學無法在沒有它們的情況下被書寫。這一說法源於真正、仔細的物理學——Marc-Olivier Renou 及其同事於 2021 年在 *Nature* 上發表的一項提案，以及 2022 年執行了它的實驗。但流行版本將一個精確的陳述壓縮成了一則口號，而這則口號比結果更強。

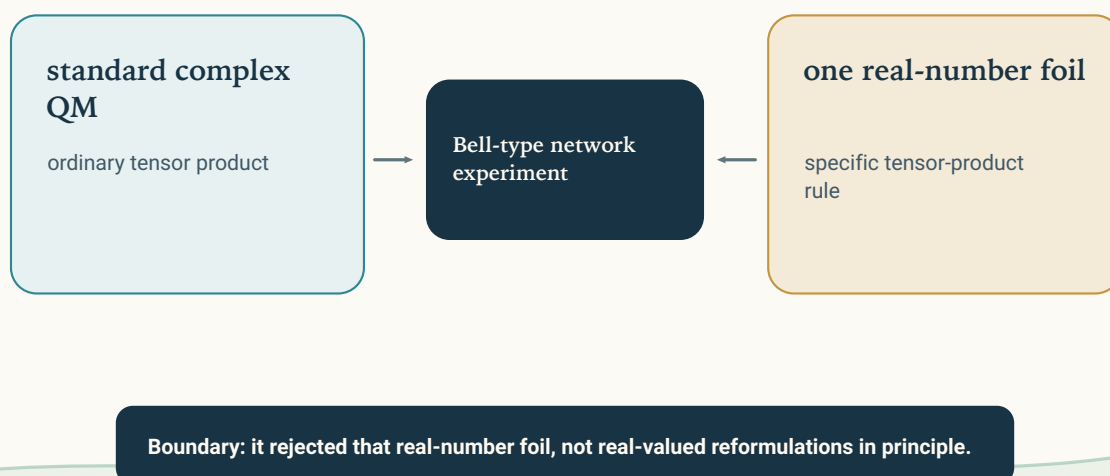
Pedro Barrios Hita、Anton Trushechkin、Hermann Kampermann、Michael Epping 和 Dagmar Bruß 在 *Physical Review Letters* 上發表的一篇新論文將精確的陳述放回了原處。它構造了一個僅使用實數的量子力學版本，並能重現標準複數理論的每一個預測——包括那些據稱排除了實數的多體實驗。訣竅不是將虛數偷偷帶回來。而是改變了一個關於分離系統如何組合的假設。誠實的結論，用作者自己的話說，是：複數對描述量子力學並非必需，但它們確實非常有用。



複振幅 $a+bi$ 是一對實數，帶有一個隨每個系統一起攜帶的「標記」。實數表述並非更少的成分——只是一個不同的容器，其代價體現在系統如何組合上。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



2021–2022 年的實驗比較了兩種特定的理論——標準複數量子力學和一個保持張量積規則的實數「陪襯」——並落在了複數量子力學上。它們排除了那個陪襯，而不是原則上的實數。

Original diagram —The Clean Paper CC BY 4.0

複數在理論中做什麼

在量子力學中，系統的狀態由振幅描述，而為了得到結果的概率，你取振幅的大小的平方。在標準理論中，這些振幅是複數：每一個都攜帶一個大小和一個相位，一個角度。那個相位不是裝飾。當通向同一結果的兩條路徑組合時，它們的相位決定它們是增強還是抵消——這種干涉正是量子行為的標誌。另一方面，整個系統共享的總體相位永遠無法被測量。

一個複數實際上只是一對實數——一個實部和一個虛部——與關於它們如何相乘的特定規則捆綁在一起。因此一個自然的問題是，這種捆綁是否至關重要。你能否保留兩個實數，去掉複數的包裝，仍然擁有全部的量子力學？乘法正是使複數超越兩個並排的數字的原因，所以答案並不顯然，而這正是微妙之處所在。

2021 年的結果實際確立了

Renou 及其同事正是問的這個問題，並賦予它一個尖銳的、可檢驗的形式。他們沒有問實數是否可以在量子理論的任何地方出現；他們問的是，一個實數表述能否在系統組合的特定規則下匹配複數理論的所有預測。那個規則——稱之為張量積規則——是將幾個獨立部分作為一個整體來描述的標準處方。

在那條規則下，他們找到了一個涉及三方共享來自兩個獨立源的糾纏的場景，在這個場景中，實數理論和複數理論預測了不同的、可測量的相關性——一種貝爾檢驗的多體版本。2022 年，使用超導電路和光子的實驗執行了這樣的檢驗。測量到的相關性匹配複數量子力學，並與實數替代方案不一致。

為什麼檢驗需要兩個源，而不是一個

一個普通的貝爾檢驗使用一個向兩個人（愛麗絲和鮑勃）發送一對糾纏粒子的單一源。對於這種設置，實數量子力學可以精確地重現與複數理論相同的相關性——兩者不可區分，因此單一源無法在它們之間做出裁決。

2021 年的論證通過增加第二個獨立源來獲得立足點。想像排成一線的三方：愛麗絲、鮑勃、查理。一個源將愛麗絲與鮑勃糾纏；一個獨立的源，沒有共享的過去，將鮑勃與查理糾纏。鮑勃位於中間，將他的兩個粒子一起測量，連接起兩半。正是兩個源的獨立性——它們被分開製備的假設——完成了這項工作：在組合獨立系統的標準張量積規則下，實數理論無法匹配複數量子力學為這一網絡預測的三方相關性，而單源檢驗則使兩個理論持平。這一差距正是實驗所測量的。

這是一個真實而乾淨的結果。但請注意它仔細比較了：標準複數理論對一種特定的實數理論——保持普通張量積規則的那一種。正是這種配對，而非實數本身，才是實驗所裁決的。這篇新論文，借用量子基礎術語，將被排除的替代方案命名為它實際所是的東西：一個陪襯理論——一個沒有人提出作為真實的理論，被設置為與被受理論的刻意對比，以便實驗能夠區分兩者。它的全部價值在於可區分性：排除陪襯顯示了實數理論的哪些假設在起作用。

新論文改變了什麼

這項新工作保留了幾乎一切，並改變了一個公設。它沒有假設組合系統的張量積規則，而是從一個局域性要求出發，作者認為這個要求在物理上更為基本：對一個子系統單獨執行的操作應對另一個未被觸及的子系統沒有可測量的影響。

從那個起點出發，他們顯式地構建了一個實數量子力學。通常振幅的實部和虛部被作為額外的實數簿記攜帶——論文稱之為附加在每個系統上的一個「標記」——而複數理論中不可觀測的全局相位變成了實數理論中同樣不可觀測的旋轉。代價恰好出現在 2021 年結果所指出的地方：在系統如何組合上。將這些實數描述粘合在一起的樸素方式甚至不能給出一個良定義的配方，因此該構造轉而將代表相同物理的描述歸為一組，並使用這些類進行工作。使用這種組合規則，實數理論重現了複數理論預測的每一個期望值——對單個系統和多個系統，跨分離方糾纏。作者還展示了該構造本質上是唯一的，並與標準量子力學等價。

因此，多體實驗無法區分這一實數理論與複數理論，因為兩者在每一個預測上都一致。早前的實驗沒有失敗；它們只是針對一個不同的、限制更強的實數理論進行了檢驗。

為什麼這不是一個矛盾

很容易將這解讀為「2021 年的實驗錯了」。恰恰相反。實驗是正確的，而這篇論文依賴於實驗的正確性：它接受了每一個測量到的相關性，並展示了一個也能產生它們的實數表述。它所修正的是解釋——從「這一實數理論被證偽」到「實數在量子力學中不可能」的跳躍。那個跳躍跳過了在起作用的假設。

論文也沒有主張任何人應該放棄複數。它自己的總結在兩方面都很謹慎：複數不是嚴格必要的，而且它們非常有用。實數構造需要在每個系統上額外附加一個標記，並使用一個更微妙的組合規則；複數將所有這些打包成一塊乾淨的算術。便利不是無物。在物理學中，它往往是整個形式體系獲勝的全部理由。

為什麼重要

底下有趣的問題是「必要」一詞對物理理論意味著什麼。實驗可以在兩個理論預測不同事物時區分它們。但它本身不能告訴你，某一特定數學成分是一組預測的唯一可能容器——這是一個關於哪些理論存在的問題，它由構造來回答，而不是由測量來回答。這篇論文是一個構造：它展示了實驗被認為已排除的替代方案。

該結果還澄清了一個普遍值得保持的區分。「這一理論被證偽」和「這一數學工具是不可避免的」是不同的陳述，兩者之間的差距正是一個乾淨的實驗結果可能變成一個過度聲稱的地方。複數仍然是量子力學的自然且高效的語言。它們在形而上學上是否必需是一個單獨的問題，而在這個問題上，目前的答案是：不。

簡潔摘要

一份 2021 年的提案和 2022 年的實驗表明，建立在組合系統的標準張量積規則上的實數量子力學做出了與複數量子力學不同、可檢驗的預測，而實驗偏好複數理論。這被廣泛報導為虛數是物理上必要的證據。這篇新的 *Physical Review Letters* 論文基於一個不同的、以局域性為基礎的公設，構造了一個實數量子力學，它能重現複數理論的所有預測，包括那些多體檢驗——表明複數是方便的而非嚴格必要的。它是一個理論構造，不推翻早前的實驗，也不呼籲在實踐中重新表述量子力學。

No-BS 檢查

論文所展示的：一個僅使用實數的自治量子力學表述可以重現標準複數理論的每一個預測，包括多體貝爾型實驗，如果它是建立在局域性公設而非張量積規則的基礎上。

合理但非重點：這「反駁」了 2021–2022 年的結果。並非如此。它接受那些實驗為正確，並重新解釋了它們的範圍：它們排除了一個特定的實數理論——保持張量積規則的那個——而不是原則上的實數。

它所沒有顯示的：複數是錯的、無用的或在實踐中值得放棄——論文明確稱它們為非常有用。它也不是一個新實驗：沒有測量任何數據；聲稱的是一個數學構造和一致性證明。

對普通讀者的主要侷限：論證轉向你認為哪個假設在物理上更基本——張量積規則還是局域性公設。這是一個在持續的基礎爭議中的理性選擇，而不是一個由測量固定的事實，而實數構造可以說它匹配的複數構造更不自然。

普通讀者應抱有多大信心？對構造在數學上是一致的——高度信心，它經過了同行評議，其邏輯是可檢驗的。值得信任的教訓是謙遜的：複數是量子力學的便利語言，而不是一個被證明的形而上學必然。將任何形如「虛數是真實的」的標題視為這篇論文被撰寫出來以糾正的口號。

來源

P. Barrios Hita, A. Trushechkin, H. Kampermann, M. Epping and D. Bruss, Physical Review Letters 136, 240202 (2026), DOI 10.1103/4k13-sdjh
<https://doi.org/10.1103/4k13-sdjh>